

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja Tehnoloogiateaduskond

Füüsika Instituut

Henri Rästas

LAINEENERGIA RANNAALAL
NEELDUMISE RUUMILINE JAOTUS
KOGU LÄÄNEMERE RANNAJOONE
ULATUSES

Bakalaureusetöö

Juhendajad:

TTÜ MSI juhtivteadur prof. Urmas Raudsepp

TÜ FI Dotsent Hanno Ohvri

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	3
1 Teoreetilised alused	4
1.1 Lineaarne laineteooria	4
1.1.1 Väikese amplituudiga pindlainete võrrand	4
1.1.2 Laineenergia	8
1.2 SWAN mudel	10
1.2.1 Mudeli tööpõhimõte	10
1.2.2 Mõjuallikad	12
1.2.3 Arvutuste ülesseadmine	14
2 Arvutused	15
2.1 Andmete formaat	15
2.1.1 Merepunktid	15
2.1.2 Rannajoon	15
2.2 Energia arvutamine	16
3 Töö tulemused ja arutelu	18
Kokkuvõte	23
Kasutatud kirjandus	23
Spatial distribution of absorption of wave energy along the shoreline of the Baltic Sea	27
A Matlabi kood	28

Sissejuhatus

Lainetus on peamine randade evolutsiooni mõjutav faktor, seetõttu on lainetust ka pikemat aega uuritud. Arvestades Läänemere randade, eriti ida ja põhjarandade dünaamilisust [1], pakub lainetus siin veelgi rohkem huvi. Läänemere lainekliima uurimiseks on siiani kasutatud nii pikaajalisi vaatlusi kui ka numbrilisi mudeleid [2]. Sarnaselt käesolevale tööle on pikaajalisi, aastate 1970-2007, WAM lainemudeli tulemusi analüüsitud, et leida, milline on potentsiaalne lainetuse energia Läänemere idaosa rannalähedas alas [3]. Samuti on varasemalt näidatud, et lainemõju rannale ei ole ühtlane. Põhja-Prantsusmaa ranniku erosiooni, juurdekasvu ja stabiilsed alad vahelduvad kiiresti, liikudes piki rannajoont [4].

Alljärgnevas töös alustatakse lineaarse laineteooria kirjeldamisest ning tuletatakse laineenergia arvutamiseks vajalik valem. Seejärel tutvustatakse SWAN numbrilist lainemudelit ning selle abil tehtud arvutuste ülesehitust. Töö originaalseks osaks on kogu Läänemäere rannajoone jaoks arvutatud laineenergia neeldumise ruumiline jaotus.

Antud töö eesmärgiks on saada hinnangud lainetuse mõju jaotuse kohta kogu Läänemere rannajoone ulatuses. Selleks kasutatakse SWAN mudeli, mis on rakendatud kogu Läänemere jaoks, laineparameetrite arvutuse tulemusi. Arvutused on teostatud 41-aastase perioodi kohta (1965-2005). Töös arvutatakse lainetuse energia rannajoonele lähimates mudeli punktides ning sellest rannaalas neeldunud laineenergia. Sõltuvalt domineerivast laine suunast, võib rannaalas neeldunud laineenergia olla oluliselt erinev rannalähedase lainetuse energiast, eriti just piirkondades, kus rannajoon on tugevalt liigendatud. Samuti on arvutatud Läänemere rannaalal neeldunud laineenergia muutused piki rannajoont. Töö tulemused võimaldavad edaspidi hinnata, millised Läänemere rannaalad on potentsiaalsed ranna erosiooni ja juurdekasvu alad, millised alad on püsivad ning kuidas on toimunud randade evolutsioon ajas.

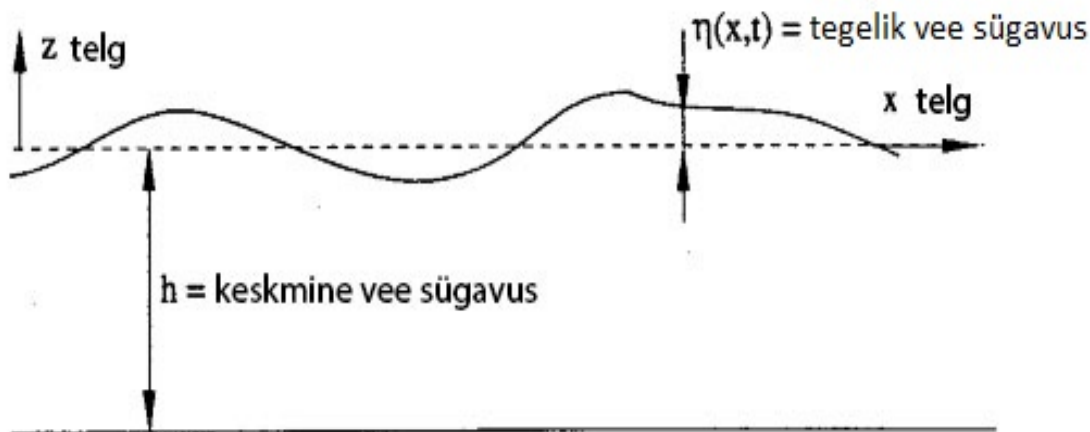
1 Teoreetilised alused

Antud peatükis luuakse ülevaade töö teoreetilistest alustest. Peatükk koosneb kahest põhilisest osast: lineaarne laineteooria ja SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [5] mudeli teooria. Alustame lineaarsest laineteooriast, esitades formalismi ja tuletades laineenergia avaldise, mida kasutades on võimalik arvutada lainetuse mõju rannale. Seejärel selgitame SWAN mudeli tööpõhimõtet ning kirjeldame töös kasutatud arvutuste ülesehitust.

1.1 Lineaarne laineteooria

1.1.1 Väikese amplituudiga pindlainete võrrand

Selles peatükis on üritatud võimalikult lihtsalt avaldada väikese amplituudiga pindlainete liikumist kirjeldavad võrrandid ilma sügavamalt hüdrodünaamikasse laskumata. Alustame tuletuskäiku, vaadeldes laineid, mis asuvad paralleelsete seintega ja horisontaalse põhjaga kanalis. Eeldame, et lained liiguvad piki kanalit ning ristisuunas lainetust ei toimu.



Joonis 1. Lained kanalis [6].

Veepinnal olevad lained panevad liikuma ülejäänud vee ning iga punkti (x, z) korral on vee kiirus $\mathbf{v}(x, z, t) = u(x, z, t)\mathbf{i} + w(x, z, t)\mathbf{k}$, kus \mathbf{i} ja \mathbf{k} tähistavad vastavalt x - ja z -telje suunalisi ühikvektoreid ning u ja w vastavaid komponente [7, 6]. Võime vee lugeda kokkusurumatuks vedelikuks,

kuna vaatleme rannalähedasi laineid atmosfäärirõhu juures, ja saame üldist pidevuse võrrandit lihtsustades kirjutada pidevuse võrrandi [6]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}(u, w)) &= 0, & \rho &= \text{const} \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Kui lisaks lugeda, et vesi on ka mitte pöörlev¹, saame kiiruse komponendid u ja w avaldada ka kiiruspotentsiaali $\Phi(x, z, t) = \nabla \mathbf{v}$ kaudu [8]

$$\begin{aligned}u &= \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \\ w &= \frac{\partial \Phi}{\partial z}.\end{aligned}\tag{2}$$

Pannes kiiruse komponendid võrrandist (2) võrrandisse (1), võime vee pidevuse võrrandi kirjutada kujul

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0.\tag{3}$$

Võrrandi (3) näol on tegemist juba tuntud Laplace'i võrrandiga ning kui paneme paika ka piirtingimused, siis on meil võimalik saada lahend, mis kirjeldab vee liikumist [6].

Esimese ja kõige lihtsama piirtingimuse saame veepõhja jaoks. Kuna põhi on vee jaoks läbimatu, siis peab põhja normaali suunaline kiiruse komponent olema 0 [9]. Seega piirtingimuseks on

$$w(x, z = -h, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, z = -h, t) = 0.\tag{4}$$

Järgmise piirtingimuse paneme paika veepinna jaoks. Väikese amplituudiga lainete korral saame veepinna ajalise muutuse lugeda võrdseks vertikaalse liikumise kiirusega [9]

$$\frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = w(x, 0, t).\tag{5}$$

Võrrandiga (5) oleme toonud sisse uue tundmatu - veepinna kõrguse $\eta(x, t)$. $\eta(x, t)$ jaoks saame piirtingimuse, kasutades mittestabiilse voolamise Bernoulli võrrandit [9, 6]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + \frac{p}{\rho} + g\eta = f(t),\tag{6}$$

¹Loeme vee voolamise laminaarseks, aga eeldame, et kiiruspotentsiaal sõltub ajast ning seega ei ole voolamine stabiilne[8].

kus ρ on veetihedus, p on rõhk vee pinnal ning funktsioon $f(t)$ on integreerimisest tekkinud liige. $f(t)$ võime asendada suvalise sobiva funktsiooniga, näiteks $f(t) = \frac{p_{atm}}{\rho}$, kus p_{atm} on atmosfääri rõhk [6]. Kuna tegeleme väikeste lainetega, siis võime rõhu veepinnal lugeda konstantseks ja võrdseks atmosfääri-rõhuga [10] ning seega saame $\eta(x, t)$ jaoks võrrandi

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \mathbf{v}^2 + g\eta = 0. \quad (7)$$

Lineaarne laineteooria tegeleb lainetega, mille amplituud on palju väiksem lainepikkusest [9, 8]. Sellisel juhul on võrrandi (7) teine liige $\frac{1}{2} \mathbf{v}^2$ tühiselt väike ja saame viimase piirtingimuse kujul [6]

$$\frac{\partial \Phi(x, 0, t)}{\partial t} = -g\eta(x, t). \quad (8)$$

Oleme nüüd paika pannud Laplace'i võrrandi kõik vajalikud lineariseeritud piirtingimused ja seega püstitanud tervikliku matemaatilise probleemi [11]:

$$\frac{\partial^2 \Phi(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi(x, z, t)}{\partial z^2} = 0, \quad -h \leq z \leq \eta \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, z = -h, t) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, 0, t), \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, 0, t) = -g\eta(x, t). \quad (12)$$

Otsime sellele võrrandile lahendit kujul [8]

$$\Phi(x, z, t) = A(z) \sin(\omega t - kx + \phi_0), \quad (13)$$

kus k, ω ja ϕ_0 on tundmatud ning A on amplituud, mis sõltub sügavusest z . Pannes funktsiooni (13) võrrandisse (9), saame

$$\left(\frac{\partial^2 A(z)}{\partial z^2} + k^2 \right) \sin(\omega t - kx + \phi_0) = 0. \quad (14)$$

Kuna antud võrrand peab kehtima iga x ja t puhul [6], siis peab kehtima $\left(\frac{\partial^2 A(z)}{\partial z^2} + k^2 \right) = 0$ ja saame $A(z)$ jaoks võrrandi

$$A(z) = C_1 \cosh(kz + C_2). \quad (15)$$

Kasutades piirtingimust (10) saame, et

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, z = -h, t) = \frac{dA}{dz}(z = -h) \sin(\omega t - kx + \phi_0) = 0. \quad (16)$$

Jällegi peab see võrrand kehtima iga x ja t puhul, seega

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz}(z = -h) &= 0, \\ kC_1 \sinh(-kh + C_2) &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ning saame, et $C_2 = kh$. Tingimus (12) annab $\eta(x, t)$ jaoks võrrandi

$$\eta(x, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t}(x, 0, t) = -\frac{\omega}{g} C_1 \cosh(kh) \cos(\omega t - kx + \phi_0) \quad (18)$$

ja $\frac{\partial \eta}{\partial t}(x, t)$ jaoks

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}(x, t) = \frac{\omega^2}{g} C_1 \cosh(kh) \sin(\omega t - kx + \phi_0). \quad (19)$$

Piirtingimus (11) annab meile

$$\frac{\omega^2}{g} C_1 \cosh(kh) \sin(\omega t - kx + \phi_0) = \frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, 0, t) = kC_1 \sinh(kh) \sin(\omega t - kx + \phi_0) \quad (20)$$

ning kuna ka see võrrand peab kehtima iga x ja t puhul, saame ω ja k jaoks dispersiooniseose [10] ehk laine sageduse sõltuvuse lainearvust:

$$\frac{\omega^2}{g} \cosh(kh) = k \sinh(kh) \quad \rightarrow \quad \omega^2 = gk \tanh(kh). \quad (21)$$

Näeme, et iga $k \neq 0$ jaoks on võimalikud kaks vastavat lahendit: ω ja $-\omega$. Kui valime $\phi_0 = -\frac{\pi}{2}$ ning $\frac{\omega}{g} C_1 \cosh(kh) = a$, saame η jaoks võrrandi

$$\eta(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (22)$$

ning kiiruspotsiaali Φ jaoks saame

$$\begin{aligned} \Phi(x, z, t) &= C_1 \cosh(k(z + h)) \sin(\omega t - kx - \frac{\pi}{2}) \\ &= \left(\frac{ag}{\omega \cosh(kh)} \right) \cosh(k(z + h)) \cos(\omega t - kx) \\ &= \frac{ag \cosh(k(z + h))}{\omega \cosh(kh)} \cos(\omega t - kx), \end{aligned} \quad (23)$$

mis sügavas vees, kus sügavus on suurem kui pool lainepikkust, lihtsustub kujule

$$\Phi(x, z, t) = -\frac{ag}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t). \quad (24)$$

Oleme nüüd leidnud lineaarse laineteooria alustaladeks olevad võrrandid Φ (24) ja η (22) kohta ning avaldanud ka dispersiooniseose (21).

1.1.2 Laineenergia

Kasutades lineaarse laineteooria võrrandeid kiiruspotentsiaali ja dispersiooni kohta, avaldame laineenergia valemi pinnaelemendi kohta.

Laineenergia saame jagada kaheks komponendiks: kineetiliseks ja potentsiaalseks. Potentsiaalse energia avaldamiseks vaatleme veesammast läbilõikega dA [6]. Selle veesamba potentsiaalne energia on

$$dE_p = \int_{z=-h}^{\eta} \rho g z dV = dA \int_{z=-h}^{\eta} \rho g z dz = dA \rho g \frac{\eta^2 - h^2}{2}. \quad (25)$$

Potentsiaalsest energiast pakub huvi vaid see osa, mis on kõrgemal keskmisest veetasemest [6]. Lahutame eelnevalt avaldatud potentsiaalsest energiast nullnivoole vastava potentsiaalse energia ning avaldame selle pinnaühiku kohta:

$$\frac{dE_p - dE_p(\eta = 0)}{dA} = \frac{1}{2} \rho g \eta^2. \quad (26)$$

Töö edasistes arvutustes kasutatakse mudeli andmeid, mis on keskmistatud üle 15 minutilise perioodi. Seetõttu ei ole mõistlik avaldamises enam kasutada η hetkväärtust. Selle asemel kasutame η^2 keskvaartust, mis amplituudiga a siinuslaine (ja ka koosinuslaine) puhul on võrdne $a^2/2$ [12].

Seega on keskmine potentsiaalne energia ühikpindala kohta

$$\left\langle \frac{dE_p}{dA} \right\rangle = \frac{\rho g a^2}{4}. \quad (27)$$

Kineetilise energia komponendi tuletamiseks kasutame valemit $dE_k = \frac{v^2 dm}{2}$, kus asendame $dm = \rho dV$ ning kirjutame kiiruse komponentides lahti

$$dE_k = \int_{z=-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) dV. \quad (28)$$

Eelnevalt teame, et kiiruse komponendid on kiiruspotsiaali tuletised vastavasuunalise koordinaadi järgi, ning kuna meid huvitavad sügavas vees olevad väikese amplituudiga lained, siis saame kiiruse komponendid kirjutada kujul [9]

$$\begin{aligned}
 u^2 + w^2 &= \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \\
 &= \left(\frac{ag}{\omega} \right)^2 \left((ke^{kz} \sin(kx - \omega t))^2 + (ke^{kz} \cos(kx - \omega t))^2 \right) \\
 &= (\omega a)^2 e^{2kz}
 \end{aligned} \tag{29}$$

ja kineetilise energia pinnaühiku kohta

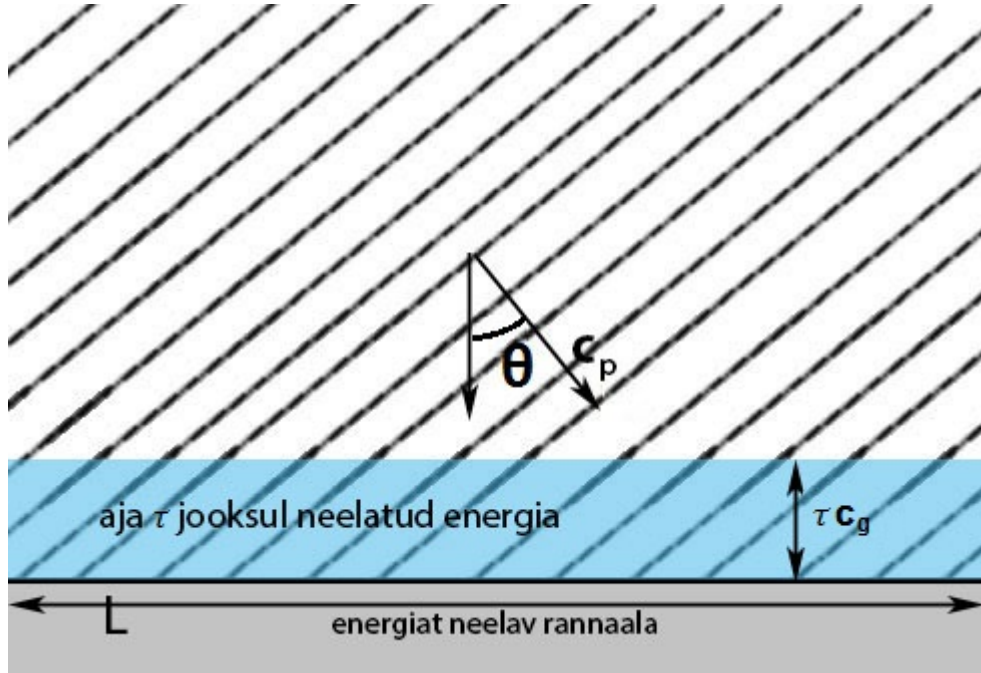
$$\begin{aligned}
 \frac{dE_k}{dA} &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 a^2 \int_{z=-h}^{\eta} e^{2kz} dz \\
 &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 a^2 \int_{-\infty}^0 e^{2kz} dz \\
 &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 a^2 \frac{1}{2k} = \frac{1}{4} \rho a^2 g.
 \end{aligned} \tag{30}$$

Nagu näeme, siis on laineenergia kineetiline ja potentsiaalne komponent võrdsed ja keskmine energia horisontaalse pinnaühiku kohta on

$$\frac{dE}{dA} = \frac{1}{4} \rho a^2 g + \frac{1}{4} \rho a^2 g = \frac{1}{2} \rho a^2 g. \tag{31}$$

Kuna huvitume laineenergia mõjust rannajoonele, siis peame leidma, kui palju laineenergiat kantakse randa ajaühiku jooksul. Energia edasikandumise kiirus ei ole võrdne lainete faasikiirusega, vaid nende grupikiirusega [10, 6], ning grupikiiruse saame teada dispersiooniseosest (21). Sügavas vees $\tanh(kh) \approx 1$ [8] ja grupikiirus on

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\sqrt{gk})}{dk} = \frac{\sqrt{g}}{2\sqrt{k}} = \frac{c_p}{2}. \tag{32}$$



Joonis 2. Laineenergia neeldumine rannas.

Grupikiiruse saab avaldada ka laine perioodi kaudu ning sügava vee puhul on see[13]

$$c_g = \frac{gT}{4\pi}. \quad (33)$$

Eeldades, et kogu energia rannajoonel neelatakse, saame, et ajaühiku kohta neelab ühikulise pikkusega rannajoon energia

$$J = \frac{\frac{1}{2}\rho a^2 g(\cos(\theta)c_g\tau)L}{\tau L} = \frac{\rho a^2 g^2 \cos(\theta)T}{8\pi}. \quad (34)$$

1.2 SWAN mudel

1.2.1 Mudeli tööpõhimõte

SWAN mudel on kolmanda põlvkonna² lainemodelleerimise mudel, mis on mõeldud kasutamiseks madalates veekogudes ja rannalähedastel aladel, kus lainetust tekitab peamiselt tuul [5]. Veekogu olekut kirjeldatakse laine mõjutiheduse kahedimensionaalse spektrina, kus mõjutiheduse spekter

²Kolmanda põlvkonna mudel erinevalt esimese ja teise põlvkonna mudelitest arvestab arvutustes ka lainete omavalguse mittelineaarseid vastastikmõjusid[14].

on defineeritud kui energiatiheduse spektri ja selle suhtelise sageduse jagatis $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ [15]. Mõjutiheduse spektrit kasutatakse energia spektri asemel, kuna mõju spekter on invariantne ümbritsevate hoovuste suhtes. Spektri ajalist muutumist cartesiuse koordinaatides kirjeldab võrrand [5]

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma}, \quad (35)$$

kus

$\frac{\partial}{\partial t}N$ näitab mõjutiheduse kohalikku muutust,

$\frac{\partial}{\partial x}c_xN$ iseloomustab mõju liikumist x -telje suunas kiirusega c_x ,

$\frac{\partial}{\partial y}c_yN$ iseloomustab mõju liikumist y -telje suunas kiirusega c_y ,

$\frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N$ määrab suhtelise sageduse muutumise sügavuse ja hoovuste varieeruvuse tõttu,

$\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N$ määrab sügavuse muutumisest ja hoovustest põhjustatud refraktsiooni.

Suurused c_σ ja c_θ on kiirused spektri ruumis (σ, θ) , kus σ ja θ on vastavalt ringsagedus ja liikumise suund. Võrrandi paremal pool olev liige $S = S(\sigma, \theta)$ määrab mõjuallikate energiatiheduse ning kirjeldab allikate tekkimise, hajumise ja lainete vastastikuse mittelineaarse mõju. Liige S koosneb SWANis kuue protsessi tagajärjel ülekandunud energiast [16]:

$$S = S_t + S_{ml3} + S_{ml4} + S_{ms} + S_{ph} + S_{mm}. \quad (36)$$

Need protsessid on

S_t – energiaülekanne tuulelt,

S_{ml3} – mittelineaarne energiaülekanne kolme laine vastastikmõju tulemusel,

S_{ml4} – mittelineaarne energiaülekanne nelja laine vastastikmõju tulemusel,

S_{ms} – energia neeldumine lainete murdumisel sügavas vees,

S_{ph} – energia neeldumine põhjahõõrde tõttu,

S_{mm} – energia neeldumine lainete murdumisel madalas vees.

1.2.2 Mõjuallikad

Tuul

SWANis kirjeldatakse tuule poolt ülekantud energiat lineaarse ja eksponentsiaalse kasvu summana [5]

$$S_t(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta). \quad (37)$$

Lineaarne kasv on tingitud Phillipsi resonantsist [5] ning avaldub kujul

$$A = \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2\pi g^2} (u_* \max[0, \cos(\theta_{laine} - \theta_{tuul})])^4 H, \quad (38)$$

kus u_* on hõõrdekiirus³, H on konstant, mis ei luba energia ülekannet madalamal sagedusel kui Pierson-Moskowitzi sagedus⁴, ja g on raskuskiirendus [15]. Eksponentsiaalne kasv, mille tekitab Miles'i tagasiside⁵, on SWANis kirjeldatud kui [15]

$$B = \max[0, 0.25 \frac{\rho_o}{\rho_v} 28 \frac{u_*}{c} \cos(\theta_{laine} - \theta_{tuul}) - 1], \quad (39)$$

kus ρ_o ja ρ_v on vastavalt õhu- ja veetihedused ning c on lainete faasikiirus.

Kolme laine vastastikmõju

Kolme laine vastastikmõju on madalas vees peamine energia ülekande viis ning selle suurust on võimalik hinnata Urselli numbriga [5]

$$Ur = \frac{g}{8\sqrt{2\pi}} \frac{H_{m0} T_{m01}^2}{d^2}, \quad (40)$$

kus H_{m0} on oluline lainekõrgus⁶, T_{m01} on alghetkele vastav spektraalne periood ning d on vee sügavus.

³Hõõrdekiirus on nihkepinge, mis on kirjutatud kiiruse dimensiooniga [16].

⁴Pierson-Moskowitzi empiirilisel saadud energia-sagedus spektri põhjal arvutatud sagedus [16, 17].

⁵Resonants turbulentse tuule ja veepinna vahel [18].

⁶Oluline lainekõrgus on kõrgema $\frac{1}{3}$ lainete keskmine kõrgus [18].

Nelja laine vastastikmõju

Sügavas vees on spektri muutumise peamine komponent nelja laine vastastikmõju [16]. Need interaktsioonid kannavad laineenergiat spektri maksimumidest madalamatele sagedustele. SWANis on nelja laine interaktsioonide arvutamiseks kasutatud kahte meetodit: Diskreetne Vastastikmõju Lähendus ja Webb-Resio-Tracy meetod (WRT) [5].

Lainete murdumine sügavas vees

Lainete murdumisel neelduv energia arvutatakse valemist

$$S_{ms}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{kogu}}{E_{kogu}}E(\sigma, \theta), \quad (41)$$

kus E_{kogu} on kogu laineenergia integreerituna üle iga suuna ja sageduse ning

$$D_{kogu} = \alpha Q_b \overline{\sigma_{01}} H_{max}^2 (8\pi)^{-1}, \quad (42)$$

milles H_{max} on antud sügavuse juures suurim võimalik lainekõrgus, mis omakorda avaldub murdumise parameetri γ ja vee sügavuse d korrutisena $H_{max} = \gamma \cdot d$. Suurus α on SWANis võrdne ühega ning $\overline{\sigma_{01}}$ on alghetkele vastav keskmine sagedus. [16]

Põhjähõõre

Põhjähõõre avaldub SWANis [15]

$$S_{ph}(\sigma, \theta) = -C_p \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta), \quad (43)$$

kus C_p on hõõrdetegur ja k on lainearv, mis vastab spektraalsele ringsagedusele.

Lainete murdumine madalas vees

Lainete murdumist madalas vees kirjeldatakse mudelis kahel eri viisil. Vaikimisi kasutatakse [5]

$$S_{mm}(\sigma, \theta) = -\Gamma \overline{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta), \quad (44)$$

kus \bar{k} ja $\bar{\sigma}$ on vastavalt keskmine lainearv ja keskmine sagedus ning konstant Γ sõltub muudetavatest parameetritest. Võimalik on kasutada ka lähenemist, kus eeldatakse, et lained murduvad alles pärast mingi teatava küllastuse saavutamist [5]:

$$S_{mm}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left[\frac{B(k)}{B_r} \right]^{\frac{p}{2}} [\tanh(kd)]^{\frac{2-p_0}{4}} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta), \quad (45)$$

milles $B(k)$ on suuna järgi integreeritud spektraalne küllastus, $B_r = 1.75 \cdot 10^{-3}$ on küllastuse piirväärtus ning $C_{ds} = 5 \cdot 10^{-5}$ on proportsiooni koefitsient [16]. Suurus p saadakse kalibratsiooni-parameetrit p_0 kasutades:

$$p = \frac{p_0}{2} \left(1 + \tanh \left[10 \sqrt{\frac{B(k)}{B_r}} - 10 \right] \right). \quad (46)$$

1.2.3 Arvutuste ülesseadmine

SWAN mudelit (SWAN cycle III, version 40.91) jooksutati 15-minutilise integratsioonisammuga regulaarsel võrgul, mille lahutus mööda laiuskraadi oli 1' ja mööda pikkuskraadi 2'. Arvutuse tulemused väljastati iga kolme tunni järel. Võrk ulatus alates 9.5167°E kuni 30.4834°E ja 53.7583°N kuni 65.9916°N, andes seega laiuskraadi pidi 629 ja pikkuskraadi pidi 734 võrgupunkti. Võrgu sees oli kokku 106082 merepunkti ning ainult nendes punktides teostati ka arvutused. Arvutuste väljundiks olid oluline lainekõrgus (H_{m0}), keskmine laine liikumise suund (θ), maksimaalne laine periood (T_p) ning keskmine laine periood, mis vastas spektri esimesele momendile (T_{m01}). Lainete spektri kirjeldamiseks kasutati 32 sagedust ning 24 suunda. Sagedused jagati logaritmiliselt (sammuga 0.1) vahemikku 0.05Hz kuni 1Hz ning suunad olid võrdsete 15° vahedega. [19]

Arvutustel kasutati nelja laine vastastikmõju kirjeldamiseks diskreetset vastastikmõju lähendust ning kolme laine vastastikmõju iseloomustamiseks valiti $U_r = 0.2$. Murdumise parameetriks sügavas vees võeti empiirilistel kaalutlustel $\gamma = 0.73$ ning põhjahõõrde koefitsiendiks $C_p = 0.067 \frac{m^2}{s^{-3}}$. [19]

2 Arvutused

Kõik töös olevad arvutused teostati Matlab (versioon 8.4.0.150421) abil. Antud tarkvara on mõeldud eelkõige maatriks- ja vektorarvutuste tegemiseks ning seega on ka arvutuste jaoks koostatud kood optimeeritud selliseid tingimusi silmas pidades. Modelleeritud andmed arvutati aastate 1965 kuni 2005 jaoks. Selle perioodi jooksul ei muutunud ükski mudeli ettemääratud parameeter ning ei esinenud puuduvaid andmeid.

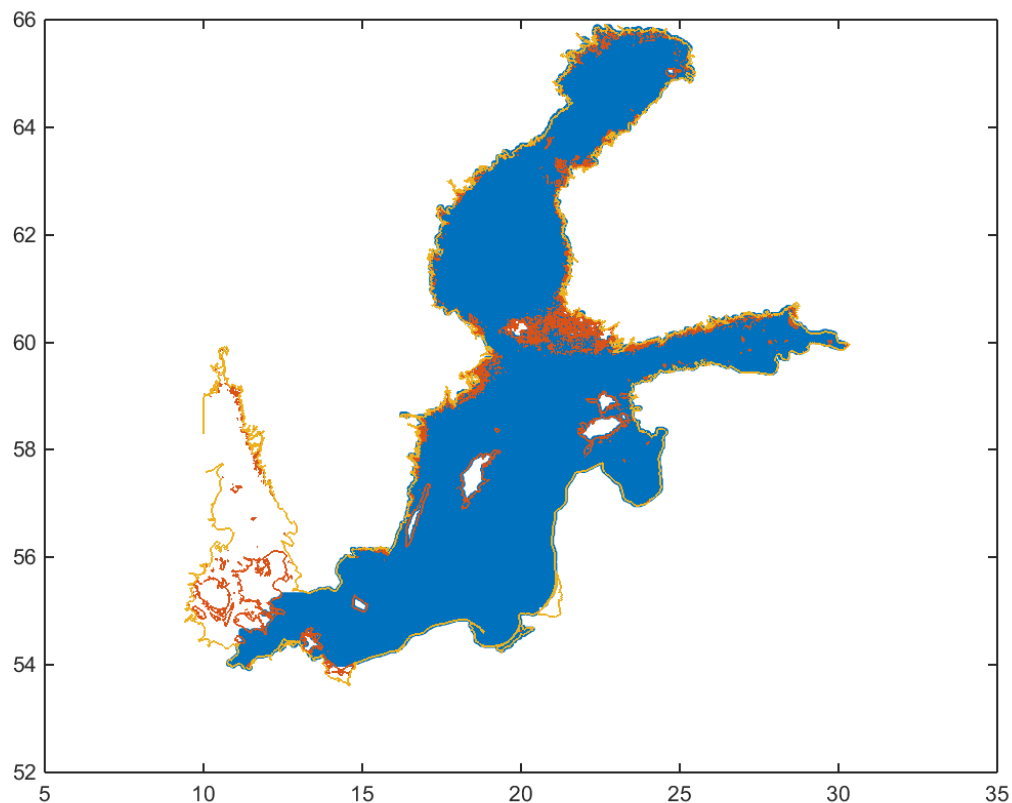
2.1 Andmete formaat

2.1.1 Merepunktid

Kogu arvutusperioodi, 41 aasta kohta salvestati iga 3 tunni järel neli laine parameetrit: lainekõrgus, -suund, -periood ja laine maksimaalne periood. Andmed salvestati vastavalt parameetritele 164 kolmemõõtmelisse maatriksisse. Iga aasta kohta oli neli maatriksi vastavalt lainekõrguse, -suuna, -perioodi ja laine maksimaalse perioodi kohta. Maatriksite read ja veerud tähistasid vastavalt laius- ja pikkuskraade ning igas kihis olid 3 tunni järel arvutatud väärtused. Ridade ja veergude arv oli kõigi maatriksite puhul konstantne: 660 rida ja 750 veergu. Liigaastate tõttu oli 40 maatriksi kihti de arv 2920 asemel 2928. 2005. aastal lõpetati arvutused 30. detsembril ning seega oli sellel aastal kokku 2912 ajahetke arvutustulemused. Võrgupunktid, mis asusid väljaspool huvipakkuvat Läänemere piirkonda, olid iga maatriksi puhul väärtusega -2 . Samuti tähistati -2 -ga merepunktid, mida kattis jää. Lainesuund märgiti vahemikus $(0, 2\pi)$, kus lõunasse liikuva laine suund on 0, läände liikuva laine suund $\frac{\pi}{2}$ jne.

2.1.2 Rannajoon

Läänemere ja selles asuvate saarte rannajoon esitati 144342 punktiga, kus saarte rannajoont tähistasid 127048 punkti ja maismaa rannajoont 17294 punkti [20]. Saarte ja maismaa rannajoone punktid asusid eraldi kaheveerulistes maatriksites, kus järjestikustel ridadel olid kõrvutiolevad punktid. Rannajoon algas Taanist ning liikus päripäeva Norrani (joonis 3). Punktidevaheline kaugus oli vahemikus 200 m kuni 17 km.



Joonis 3. Läänemere rannajoon. Kollasega on tähistatud maismaa rannajoon, punasega saarte rannajoon ning sinisega kõik punktid, kus olid arvutatud laine parameetrid.

2.2 Energia arvutamine

Energia arvutamisel oli suur roll andmete korrektsele ettevalmistamisele ning arvutuste optimeerimisele. Andmete esmane ettevalmistus nägi ette kõikidest failidest huvipakkuvate ehk kõige rannalähedasemate punktide väljavõtmist. Selleks kasutati mudeli topograafia faili, kus merepunktidele omistati väärtus 1 ja maismaapunktidele väärtus 0. Edasi leiti kõik maatriksi elemendid väärtusega 1, mille vähemalt üks naaberelement oli 0. Saadud elemendid tähistasid kõige rannalähedasemaid punkte ning neid oli kokku 6841. Viimase sammuna loodi neli uut maatriksit, mis sisaldasid 6841 merepunkti andmeid kogu arvutusperioodi jooksul.

Rannaalal neeldunud energia arvutamisel on rannajoont kõige iseloomustavamaks suuruseks rannajoone normaali nurk laine suhtes (34). Rannajoone normaali arvutamiseks loodi kõigepealt rannajoone punktidest joonelemendid, mille algus- ja lõpp-punkti määrasid järjestikused rannajoone punktid. Vektori normaali saamiseks leiti skalaarkorrutise abil kõigepealt vektoriga ristuv vektor, mis seejärel normeeriti. Edasiste arvutuste tarbeks leiti viimasena normaali ja põhjasuunalise vektori vaheline nurk vahemikus $(0, 2\pi)$.

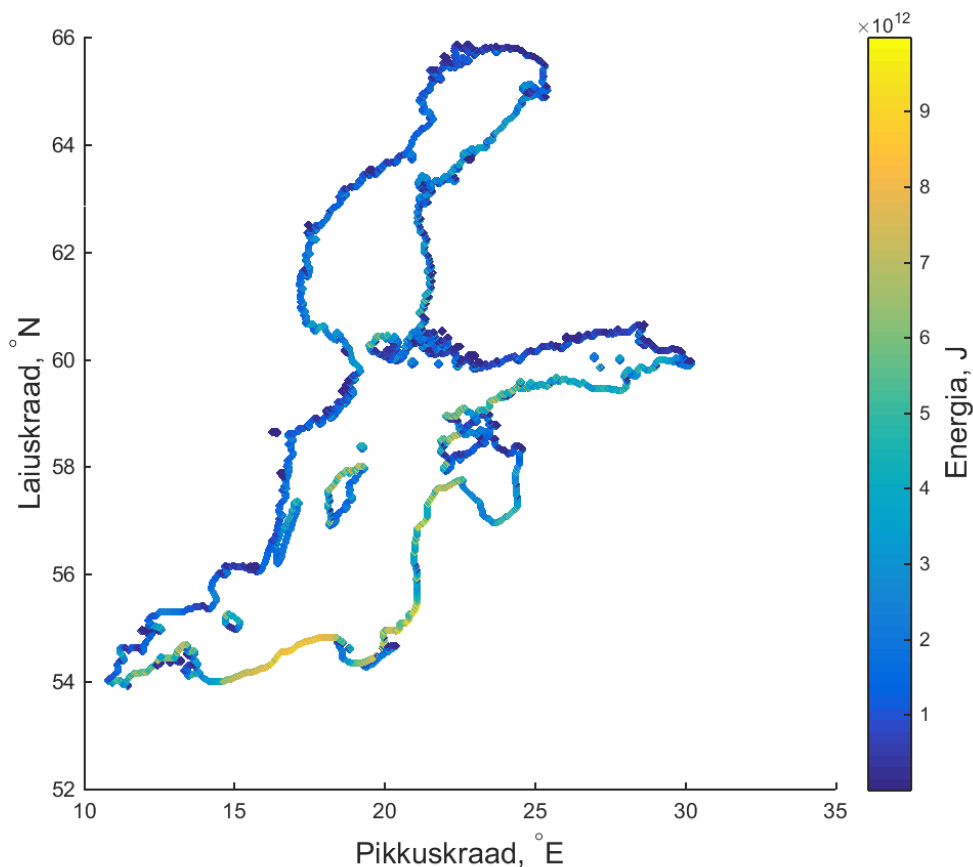
Lõpuks leiti igale rannajoone elemendile lähim merepunkt. Rannajoone elemendid olid võrreldes modelleeritud andmetega oluliselt parema resolutsiooniga ning hõlmasid ka suurema piirkonna (nt Taani väinad, joonis 3). Seetõttu eksisteeris rannaelemente, mis olid lähimast merepunktist energia tähendusrikka arvutamise jaoks liiga kaugel (joonis 3). Samuti ilmnis mudeli halvema resolutsiooni tõttu merepunkte, mis näivalt asusid maal. Lähimate merepunktide otsimisel võeti kauguse piiriks kolmekordne mudeli resolutsioon ehk ligi 6 km.

Energia arvutamise esimese sammuna ei arvestatud rannajoone normaale ning leiti energia igas merepunktis. Seejärel leiti iga arvutatud ajahetke jaoks rannajoone normaali ja tuule suuna vahelise nurga koosinus. Kõik negatiivsed koosinuse väärtused võeti võrdseks nulliga, kuna negatiivne koosinus tähendaks, et lainetus liigub rannast eemale ja seega laineenergiat randa ei jõuaks. Viimase sammuna korrutati leitud koosinuste väärtused vastavatele rannapunktidele lähima merepunkti energiaga.

Tulevaste teadustööde paremaks planeerimiseks ning randa jõudnud laineenergia analüüsiks leiti veel ka energia suhteline muutus rannajoone pikkusühiku kohta $\frac{1}{E} \frac{dE}{dr}$.

3 Töö tulemused ja arutelu

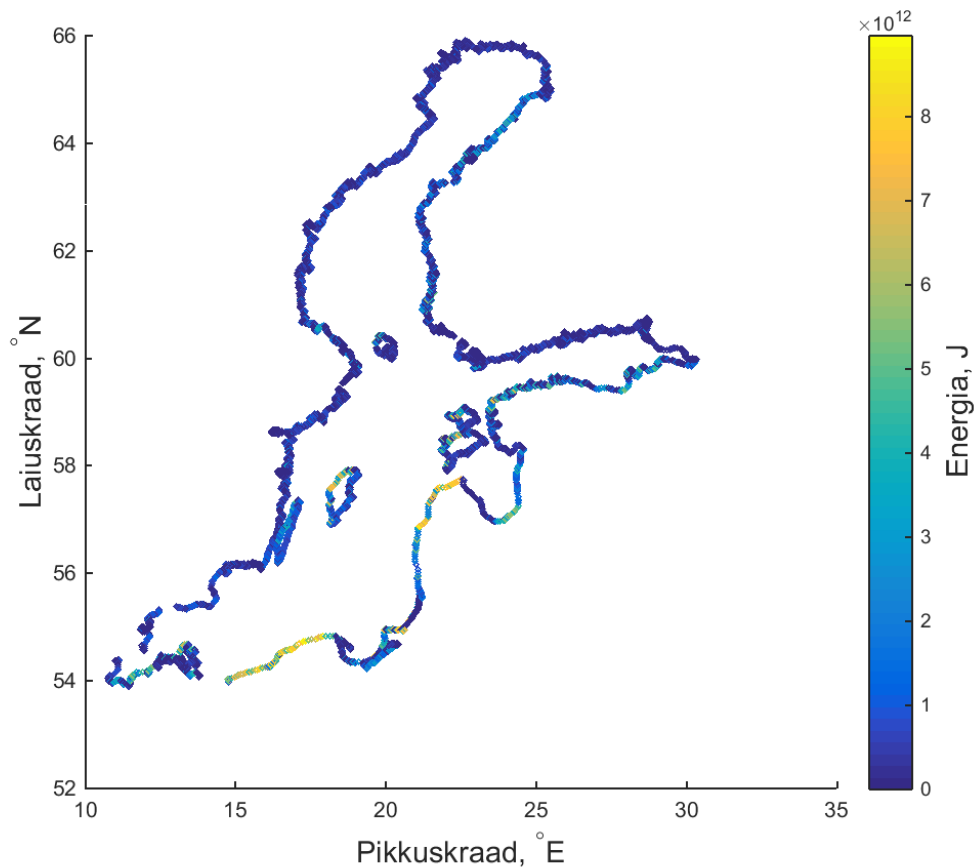
Töös tehtud arvutuste tulemusena saadud andmetest koostati neli graafikut. Esimene neist kujutab lainenergiat merepunktides, teine rannaalal neeldunud laineenergiat, kolmas graafik näitab, kui palju energiat protsentuaalselt jõuab merest randa ning neljas graafik näitab kohti, kus laineenergia muutus piki rannajoont rannajoone pikkusühiku kohta oli suurim.



Joonis 4. Aastate 1965 kuni 2005 summaarne laineenergia merepunktides.

Jooniselt 4 on võimalik näha, kui suur on rannalähedaste merepunktide 41 aasta summaarne lainenergia. Üldiselt on lõunapoolsetel aladel suurem laineenergia kui põhjapoolsetel. Selle üheks põhjuseks on kindlasti pikem jäävaba periood. Vaadeldes aga Soome lahte, on Eesti põhjarannikul oluliselt rohkem laineenergiat kui Soome lõunarannikul. Sellest tuleb välja ka teine suur erinevus Läänemere põhja- ja lõunaosa vahel. Läänemere põhjarannik on oluliselt rohkem liigendatud ning

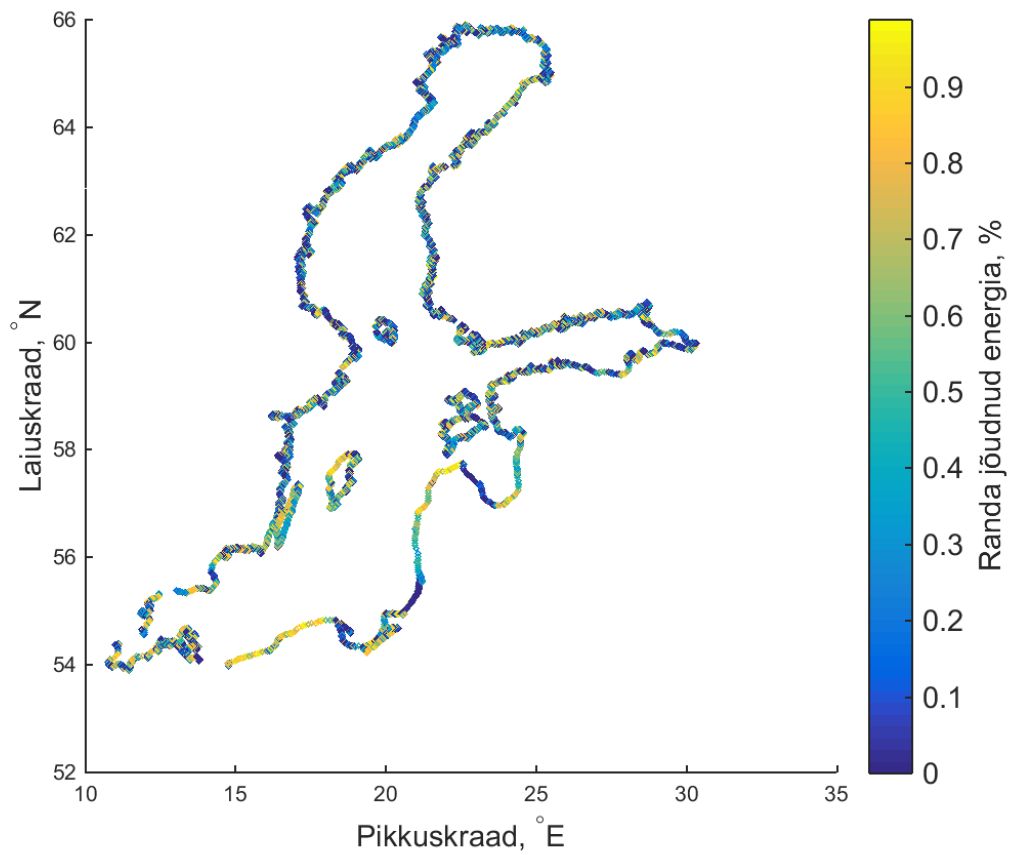
rannikualal on palju väikeseid saari ning skääre, mis kõik summutavad laineid. Samuti on joonisel näha erinevus lääne- ja idakalda vahel. Läänemerel domineerivad läänetuuled ja selle tõttu on domineerivateks laineteks läänesuunalised lained. On selge, et seeläbi peabki ida poole liikudes laineenergia kasvama.



Joonis 5. Aastate 1965 kuni 2005 summaarne laineenergia rannapunktides.

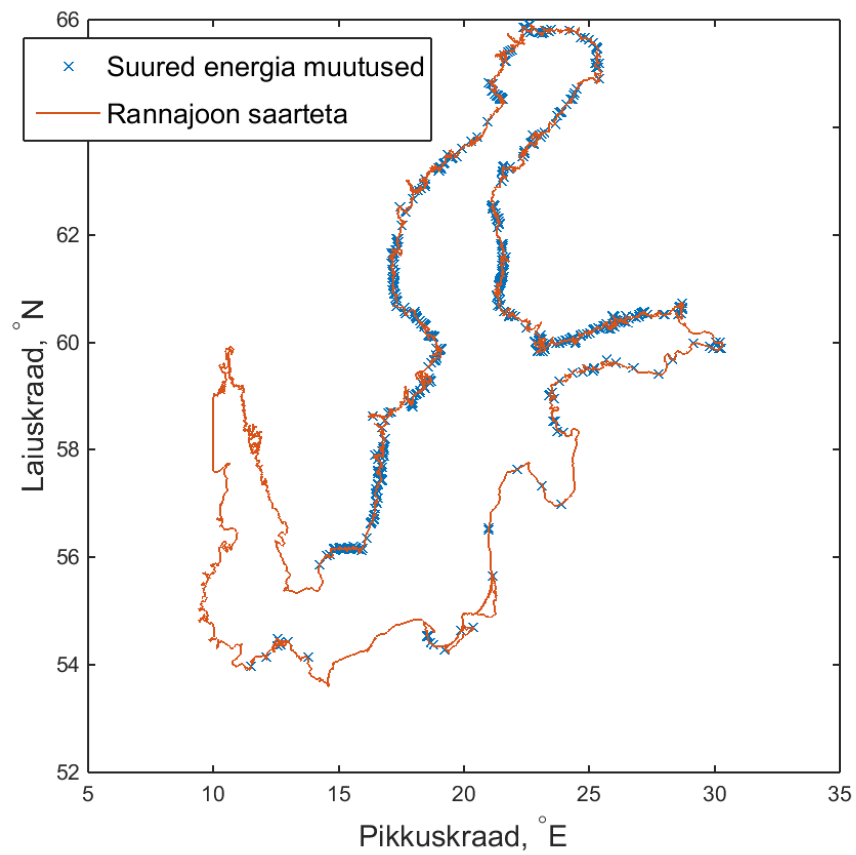
Joonisel 5 on näidatud, kui palju laineenergiat rand neelab. Randa jõudnud energia otsesemaid väljundeid on erosioon ja akumulatsioon. Arvutatud andmete õigsuse kontrollimiseks sobibki väga hästi võrdlus rannaerosiooniga. Kõige rohkem on energiat neelanud Poola põhjarannik, Läti läänerannik, Riia-lähedased alad, Saaremaa, Hiiumaa ja Ojamaa loodealad. Samuti on märgata suuremat energia neeldumist Eesti looderannikul Osmussaare piirkonnas. Kõigis neis regioonides on

pikemat aega täheldatud ulatuslikke purustusi [1]. Poola põhjarannikul on rannaerosiooniga võitlemiseks loodud lausa eraldi ametkond Polish Coastal Authority, mis tegeleb randa liiva juurde toomise ning merest tagasi pumpamisega, samuti pangastangute kindlustamisega [21]. Ulatuslikke rannajoone muutusi on märgatud ka Kolka neeme idaküljel [1], Soome lahe põhjarannikul Peterburi juures [22, 1] ning Rootsi lõunarannikul [1]. Need teadmised ei väljendu aga joonisel 5. Kolka neeme idaküljel võib probleemiks olla mudeli ebapiisav arvestamine lainete difraktsiooniga, mis tuleneb tõenäoliselt antud olukorra jaoks liiga kehvast mudeli resolutsioonist. Peterburi lähistel on erosioon suuresti tingitud asjaolust, et tormide ajal koondavad läänetuuled sinna vett ning veetaase tõuseb seeläbi ligi 3 meetrit [22]. SWAN mudel väljastab aga ainult lainekõrguse, arvestamata üldist veetaset. Rootsi lõunarannikul toimuvad muutused võivad olla põhjustatud üksikutest tormidest, mis ei saagi välja tulla 41 aasta summaarsetest andmetest. Tuleb siiski tähele panna, et randa jõudnud laineenergia on ka selles piirkonnas väga suur, ulatudes terajoulideni.



Joonis 6. Randa jõudnud laineenergia protsentuaalselt.

Jooniselt 6 on võimalik näha, kui suur osa meres olevast laineenergiast jõudis randa. Kõik alad, mis joonise 5 põhjal on neelanud absoluutskaalas palju energiat, on joonise 6 järgi neelanud ka suurema osa meres olevast laineenergiast. Samuti on siit näha, et Rootsi lõunarannik on neelanud suurema osa randa jõudnud energiast, mis toetab hüpoteesi, et sealsed rannajoone muutused on pigem põhjustatud üksikutest tormidest.



Joonis 7. Suured laineenergia muutused pikkusühiku kohta.

Joonisel 7 on kujutatud Läänemere rannajoonte asukohad, kus energia suhteline muutus piki rannajoont on olnud suur. Märkitud on ainult joonelemendid, kus energia muutus on vähemalt 60% maksimaalsest muutusest. Sellelt jooniselt tuleb väga hästi välja Läänemere põhjaranniku liigendatusest tingitud energia jaotuse erinevus, mis ei tule selgelt välja joonistelt 4 ja 5.

Kokkuvõte

Käesolevas töös tuletati kirjandusele toetudes laineenergia valem, mis sõltus vaid konstantidest ja muutujatest, mille kohta olid olemas modelleeritud andmed. Vastavalt tuletatud valemile arvutati Läänemere rannas neeldunud laineenergia hulk, kasutades 41 aasta modelleeritud andmeid. Töö teeb eriliseks asjaolu, et laineenergia on arvutatud kogu Läänemere ranna ning selles asuvate suurte saarte ranna jaoks. Samuti oli arvutuste periood pikk ja ilma puuduvate andmeteta. Lisaks rannas neeldunud laineenergiale arvutati ka rannalähedases meres olev laineenergia hulk ning laineenergia muutus piki rannajoont rannajoone pikkusühiku kohta. Arvutuste tulemusena leiti, et:

- võrreldes läänerannikuga, oli Läänemere idarannikul meres suurem summaarne laineenergia;
- Läänemere lõunapoolsetel aladel oli suurem summaarne laineenergia kui põhjapoolsetel aladel;
- Poola põhjarannik, Läti läänerannik, Riia-lähedased alad, Saaremaa, Hiiumaa ja Ojamaa loodealad neelasid 41 aasta jooksul suurima hulga laineenergiat, suurusjärgus $10^{12} J$;
- suure hulga laineenergiat neelanud rannajoon neelas ühtlasi ka protsentuaalselt suure osa meres olevast laineenergiast;
- Läänemere rannas alates Eestist kuni Rootsinini (vastupäeva liikudes) on pikki rannajoont suure energia muutused võrreldes rannaga alates Poolast kuni Kolkani.

Viited

- [1] E. Pranzini and A. Williams, *Coastal Erosion and Protection in Europe*. Routledge, 2013.
- [2] A. Jönsson, B. Broman, and L. Rahm, “Variations in the baltic sea wave fields,” *Ocean Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 107–126, 2003.
- [3] T. Soomere and M. Eelsalu, “On the wave energy potential along the eastern baltic sea coast,” *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 221–233, 2014.
- [4] S. Chaverot, A. Héquette, and O. Cohen, “Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of france during the second half of the 20 century,” *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, vol. 52, no. 3, pp. 1–20, 2008.
- [5] The SWAN team, “Scientific and technical documentation swan cycle iii version 41.01a,” tech. rep., Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section.
- [6] H. Krogstad and O. Arntsen, “Linear wave theory.” Draft.
- [7] B. Munson, A. Rothmayer, and T. Ōkiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2012.
- [8] L. Landau and E. Lifshits, *Fluid Mechanics, by L.D. Landau and E.M. Lifshitz*. Pergamon Press, 1959.
- [9] A. Chorin and J. Marsden, *A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics*. Texts in Applied Mathematics, Springer New York, 2013.
- [10] E. Shaughnessy, I. Katz, and J. Schaffer, *Introduction to fluid mechanics*. No. v. 1, Oxford University Press, 2005.
- [11] L. Evans, *Partial Differential Equations*. Graduate studies in mathematics, American Mathematical Society, 1998.

- [12] J. Freund and B. Perles, *Modern Elementary Statistics*. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [13] P. LeBlond and L. Mysak, *Waves in the Ocean*. Elsevier Oceanography Series, Elsevier Science, 1981.
- [14] L. Krueger, N. Booij, and I. Haagsma, “Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling,” *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 26, 2001.
- [15] N. Booij, R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen, “A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 104, no. C4, pp. 7649–7666, 1999.
- [16] V. Alari, *Multi-Scale Wind Wave Modeling in the Baltic Sea*. PhD thesis, PhD Thesis (Marine Systems Institute, Tallinn University of Technology), Tallinn: Tallinn University of Technology, 2013.
- [17] P. Janssen, *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge University Press, 2004.
- [18] L. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007.
- [19] V. Alari and I. Lukas, “A high resolution (2 km) 41 year long wave hindcast study for the baltic sea including ice and downscaled wind,” in *9th Baltic Sea Science Congress*, (Klaipeda, Lithuania), August 2013.
- [20] P. Wessel and W. H. Smith, “A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, vol. 101, no. B4, pp. 8741–8743, 1996.
- [21] G. Gic-Grusza and A. Dudkowska, “Modeling of wind wave induced sediment transport in the coastal zone of polish marine areas (southern baltic),” in *Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES*, pp. 1–5, May 2014.
- [22] D. Ryabchuk, A. Kolesov, B. Chubarenko, M. Spiridonov, D. Kurennoy, and T. Soomere, “Coastal erosion processes in the eastern gulf of finland and their links with geological and

hydrometeorological factors,” *Boreal Environment Research*, vol. 16 (Suppl A), pp. 117–137, 2011.

Spatial distribution of absorption of wave energy along the shoreline of the Baltic Sea

Henri Rästas

Summary

This thesis starts by deriving the wave energy formula based on literature and previous works. The formula is derived so that it would only consist of constants and variables that have corresponding modelled values. Based on that equation and modelled data for 41 years, the wave energy absorbed in the beach for the entire Baltic Sea is calculated. The uniqueness of this thesis lies in the fact that the absorbed energy is calculated for the entire Baltic Sea coastline including larger islands. It is also noteworthy that the period for the calculated data is long and without missing values. In addition to absorbed energy the energy in the coastal sea is also calculated. The final computation is done to acquire the relative change per unit length in energy along the coastline. As a result of the calculation it was obtained that:

- the gross energy on the west coast of the Baltic Sea is larger than that of the east coast;
- the southern parts of the Baltic Sea have larger total energy than northern parts;
- the Polish northern coast, Latvian western coast, areas near Riga and the northwestern parts of Saaremaa, Hiiumaa and Gotland absorbed the biggest amount of wave energy during the 41 year period;
- The parts of the coastline that absorbed the larger part of energy also absorbed most of the energy that was present in the sea;
- the changes in wave energy along the coastline were larger on the Baltic Sea shore from Estonia to Sweden (when moving counter-clockwise) compared to the shore from Poland to Kolka.

A Matlabi kood

```
1 %rannale lahima merepunkti leidmine
2 rand=[andmed(:,1) andmed(:,2)]; % rannajoone punktid
3 srand=[saarterannaandmed(:,1) saarterannaandmed(:,2)]; % saarte ...
    rannajoone punktid
4 ANDMED=[rand; srand]; % kogu Laanemere rannajoon
5 A=complex(Suured_saared(:,1),Suured_saared(:,2)); %loome ...
    koordinaatidest kompleksarvud
6 B=complex(rannajoon_pol(:,1),rannajoon_pol(:,2));
7 [AA,BB]=meshgrid(A,B); %loome maatriksi, kus on koikide punktide ...
    vahelised kaugused
8 save('AA.mat','AA','-v7.3');save('BB.mat','BB','-v7.3');clear AA BB; % ...
    salvestame maatriksid kovakettale, et vabastada maluruumi
9 AA=matfile('AA');BB=matfile('BB'); %loome maatriksite viited sisse
10 kaugus=abs(AA-AA-BB.BB); %leiame koikide punktide kaugused uksteisest
11 [min_kaugus,min_indeks]=min(kaugus); %leiame igale rannajoonele lahima ...
    merepunkti
12 liigakaugel=(min_kaugus>0.05); %leiame mrepunktid, mis on rannast ...
    kaugemal kui 6km
13 clear A B AA BB kaugus rand srand
```

```

1 %rannajoone normaali leidmine ja nurga arvutamine
2 %leiame rannajoone keskpunkti
3 x=(land_poly(2:17295,1)+land_poly(1:17294,1))/2;
4 y=(land_poly(2:17295,2)+land_poly(1:17294,2))/2;
5 %vektoriga (x,y) ristuv vektor on (-y,x)
6 nx=(land_poly(1:17294,2)-land_poly(2:17295,2))*2;
7 ny=(land_poly(2:17295,1)-land_poly(1:17294,1))/2;
8 normaal=[x+nx y+ny];
9 rannajoon=[x y];
10 %leiame nurga normaali ja pohjasuunalise vektori vahel
11 k1=[rannajoon(:,1) normaal(:,2)];
12 n1=[normaal(:,1) normaal(:,2)];
13 j1=[rannajoon(:,1) rannajoon(:,2)];
14 u=bsxfun(@rdivide, (k1-j1), sqrt(diag((k1-j1) * (k1-j1)'))));
15 v=bsxfun(@rdivide, (n1-j1), sqrt(diag((n1-j1) * (n1-j1)'))));
16 nurgad=acos(dot(u',v'))*57.3;
17 nurgad=nurgad';
18 %teisendame nurga vahemikus (0,90) vahemikku (0,360)
19 kraad0=find(normaal(:,2)>rannajoon(:,2) & normaal(:,1)>rannajoon(:,1));
20 kraad90=find(normaal(:,2)<rannajoon(:,2) & normaal(:,1)>rannajoon(:,1));
21 kraad180=find(normaal(:,2)<rannajoon(:,2) & normaal(:,1)<rannajoon(:,1));
22 kraad270=find(normaal(:,2)>rannajoon(:,2) & normaal(:,1)<rannajoon(:,1));
23 k90=find(normaal(:,2)==rannajoon(:,2) & normaal(:,1)>rannajoon(:,1));
24 k270=find(normaal(:,2)==rannajoon(:,2) & normaal(:,1)<rannajoon(:,1));
25 nurgad(kraad90)=180-nurgad(kraad90);
26 nurgad(kraad180)=nurgad(kraad180)+180;
27 nurgad(kraad270)=360-nurgad(kraad270);
28 nurgad(k90)=90;
29 nurgad(k270)=270;
30 rannaandmed=[rannajoon nurgad];
31 save('C:/Users/henri/Desktop/kool/Kolmas aasta/kuues ...
    semester/Bakatoo/andmed_arvutatud/normaalid.mat','rannaandmed','-v7.3')
32 clear x y nx ny normaal rannajoon nurgad kraad0 kraad90 kraad180 ...
    kraad270 k90 k270 u v n1 j1 k1 k l rannaandmed

```

```

1 %leiame randa joudnud energia
2 HM0=HM0.HM0; %loeme algandmed sisse
3 HMruudus=HM0.*HM0;
4 Tm01=Tm.Tm01;
5 HMT=HMruudus.*Tm01*3*3600; %merpunktides olev laineenergia
6 clearvars Tm01 HMruudus HM0
7 DIR=DIR.DIR;
8 nurk=andmed(:,4);
9 Koosinus=cos(deg2rad(bsxfun(@minus,DIR,nurk)));
10 clearvars DIR
11 E=(HMT.*Koosinus*1029*9.8*9.8/(8*3.14)); %randa joudnud laineenergia
12 clearvars HMT Kos
13 save('Energia.mat','E','-v7.3');
14 clear E

```

```

1 %energia muutus pikkusuhiku kohta
2 ranna_sum_energia(ranna_sum_energia==0)=[]; %eemaldame punktid, kus ...
    energia on 0
3 algus=rand(1:end-1,1:2);
4 energial=ranna_sum_energia(1:end-1);
5 lopp=rand(2:end,1:2);
6 energia2=ranna_sum_energia(2:end);
7 E=(energia1+energia2)/2; %kahe punkti keskmine energia
8 muutus=zeros(12949,1);
9 for i=1:(numel(algus)/2)
10     dr=haversine(algus(i,:),lopp(i,:)); %kahe punkti vaheline kaugus
11     muutus(i)=(energia2(i)-energial(i))/(E(i)*dr); %kahe punkti ...
        vaheline suhteline energia muutus
12 end

```

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Henri Rästas

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

“LÄÄNEMERE RANNIKUALA LAINEKLIIMA”

mille juhendajad on Urmas Raudsepp ja Hanno Ohvril

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu alates **01.06.2015** kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **26.05.2015**